

DOI: 10.5846/stxb201912202752

谭颖, 郑训皓, 陈慈, 刘玥, 王璐, 官昭瑛, 杨海军, 韩博平. 流溪河大型底栖动物群落的时空分布及其影响因素. 生态学报, 2021, 41(2): 747-760.

Tan Y, Zheng X H, Chen C, Liu Y, Wang L, Guan Z Y, Yang H J, Han B P. Temporal and spatial distributions of macroinvertebrates and their influencing environmental factors. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 747-760.

流溪河大型底栖动物群落的时空分布及其影响因素

谭颖^{1,2}, 郑训皓¹, 陈慈³, 刘玥³, 王璐², 官昭瑛⁴, 杨海军⁵, 韩博平¹

1 暨南大学生态学系, 广州 510632

2 东北师范大学草地科学研究所植被生态科学教育部重点实验室, 长春 130024

3 广东省水文局广州水文分局, 广州 510150

4 深圳技师学院, 深圳 518116

5 云南大学生态与环境学院环境科学与工程系, 昆明 650500

摘要:流溪河位于我国热带与亚热带过渡区, 其底栖动物种类丰富, 群落的物种组成结构具有明显的区域性, 掌握该地区的物种组成特征及与环境要素的关系是建立生态监测与评估方法的基础。于 2018 年的枯水期(3 月、12 月)和丰水期(6 月、9 月), 自流溪河上游至下游共计 20 个段面对底栖动物进行了定量采样, 同时测定了相应的环境因子, 采用多元统计方法对流溪河水环境与群落结构及其相关关系进行了分析。共检出底栖动物 76 个分类单元, 隶属于 7 纲 20 目 50 科, 其中水生昆虫相对丰度最高, 占 69.39%。在 4 个优势分类单元中, 摇蚊族(Chironomina)相对丰度为 20.19%, 河蚬(*Corbicula fluminea*)、短沟蜷属的一种(*Semisulcospira* sp.1)、双突细螺(*Caenis bicornis*), 相对丰度在 7%—9% 之间。底栖动物丰度和种类多样性均与浊度呈显著负相关; 枯水期底栖动物丰度与总磷呈显著负相关, 丰水期则呈显著正相关。在丰水期, 不同河流级别上底栖动物群落具有明显的差异, 表现较强的分布格局, 而在枯水期这种分布格局不明显。典范对应分析(CCA)表明, 在丰水期, 影响或解释流溪河底栖动物群落变化的主要因子为 pH、溶解氧、水温、电导率和硅酸盐, 而在枯水期则为 pH 和硝态氮。受电站与采沙的影响, 部分河段发生非自然断流和底质的显著改变, 导致底质与水深等数据的异常变化, 反映了人类活动对该河流生境与环境的重要影响。

关键词:流溪河; 底栖动物; 丰富度; 季节动态; 河流等级

Temporal and spatial distributions of macroinvertebrates and their influencing environmental factors

TAN Ying^{1,2}, ZHENG Xunhao¹, CHEN Ci³, LIU Yue³, WANG Lu², GUAN Zhaoying⁴, YANG Haijun⁵, HAN Boping¹

1 Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China

2 Ministry of Education Key Laboratory of Vegetation Ecology, Institute of Grassland Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

3 Guangzhou Bureau of Hydrology, Guangdong Provincial Bureau of Hydrology, Guangzhou 510150, China

4 Shenzhen Institute of Technology, Shenzhen 518116, China

5 School of Ecology and Environmental Science, Yunnan University, Kunming 650500, China

Abstract: Liuxihe River, located in the transitional zone between the tropics and subtropics in southern China, is rich in macroinvertebrates that are characterized by species from both tropical and subtropical regions. Knowledge of the species richness and community structure provides useful information for rationalizing river ecological monitoring and assessment in this transitional zone. To explore species composition and the spatial distribution of macroinvertebrates and their

基金项目: 广东省水利科技创新项目(2016-08); 广州市科技计划项目(重点)(201704020159)

收稿日期: 2019-12-20; 修订日期: 2020-06-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tbphan@jnu.edu.cn

relationships with environmental factors in the Liuxihe River, we sampled the macroinvertebrates and measured the environmental variables during the dry (March and December) and wet (June and September) seasons in 2018 at 20 upstream and downstream sites. We used multiple regression and multivariate ordination methods to analyze the relationships between environmental factors and macroinvertebrate communities. In total, we found 76 taxa (belonging to seven classes, 20 orders, and 50 families), among which the aquatic insects had the highest abundance, accounting for 69.39% of the total abundance. Chironomina was dominant with a relative abundance of 20.19%, followed by *Corbicula fluminea*, *Semisulcospira* sp. 1, and *Caenis bicornis* with relative abundances between 7% and 9%. The total abundance and species richness of macroinvertebrates negatively correlated with turbidity and total phosphorus during the dry season but positively correlated during the wet season. During the wet season, the macroinvertebrate communities in the three river classes significantly differed from each other, but not during the dry season. Canonical correspondence analysis (CCA) showed that water temperature, silicate, salinity, dissolved oxygen, turbidity, pH, and conductivity were the main environmental variables explaining the variation in the macroinvertebrate community in the Liuxihe River. However, habitat factors such as water depth and substrate character showed an unusual variation, which indicated that the river has been largely modified by human activity and further attention is required for ecosystem management in the watershed.

Key Words: Liuxihe River; macroinvertebrate; richness; seasonality; river class

流溪河位于珠江三角洲北部,横跨北回归线,属于相对清洁河流,水生生物种类丰富,物种多样性高^[1]。作为广州市境内最重要的河流,流溪河的水质与生态状况对沿河城镇的供水安全和生态保障起着至关重要的作用。随着区域经济高速发展,受到城镇建设、旅游开发以及工农业发展的影响,流溪河从上游到下游的土地大规模开发,人为活动的影响增强,河流水体受到不同程度的污染,生态系统的功能和水质有了较为明显的退化,迫切需要开展系统性的生态监测与评估^[2-3]。

大型底栖动物是河流生态系统的重要组成生物,其处于食物链或食物网的中间环节,参与河流生态系统物质循环和能量流动,对维持河流生态系统的完整性起着重要作用^[4-5]。底栖动物对河流水质变化敏感程度存在类群上的差异,底栖动物的出现或消失可以表征自然环境的变化或人类干扰对水生生态系统造成的持久性和间断性影响,已广泛作为河流监测的最重要生物类群^[6]。掌握底栖动物的生境与空间分布特点,揭示底栖动物的群落结构及其与河流环境因子的相关性,是河流的生态监测和评估的重要内容^[7-9]。流溪河地处热带与亚热带过渡区,生物群落的物种组成会不同于中、高纬度地区的河流,在种类组成上具有明显的区域性^[1,10-12]。目前针对该地区的河流底栖动物群落系统性的研究还较少,对其物种多样性与群落结构的特征还缺少完整认识,难以满足地方开展生态监测与评估的需要。林罗敏、刘帅磊等分别对该河流进行了季节性调查,采用底栖动物完整性指数(B-IBI)对流溪河进行了生态健康的初步评价^[13-14]。为了进一步分析流溪河底栖动物群落结构的季节动态与空间变化特征,本研究在林罗敏等设置的20个调查样点的基础上,于2018年对流溪河进行了季节性调查,同时测定了相关环境理化因子。本文基于河流等级对采样点所代表的河段进行分组,通过对底栖动物群落与环境理化数据进行统计学分析,测定底栖动物群落的种类组成与生物多样性特征,探讨影响群落季节与空间变化的主要因素,为流溪河水质监测与评估体系的建立和生态管理提供基础数据与理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

流溪河是广州市重要的水源地之一,发源于广州市北部从化吕田桂峰山,经从化区良口、街口、太平、花都区花东、黄埔区九龙、白云区钟落潭、人和至江村南岗口与白坭河相汇注入珠江。水系地理坐标为东经113°10'12"至114°2'00",北纬23°12'30"至23°57'36",北回归线横贯流域中部。流溪河水系的地貌属于华南台

地的一部分,为粤北山区与珠江三角洲平原的过渡地带,东北高、西南低,形状从东北至西南呈狭长形,南北长约 116 km,东西宽约 20 km,上游为山区,间有小平原,良口以下逐渐进入丘陵平原区。流溪河上游土地利用类型以森林和种植用地为主,中游以村庄、果园和农垦为主,下游出现城镇用地、工业用地和耕地等,从上游到下游城市化和人为干扰逐渐加重。

流溪河归属珠江三角洲水系,干流全长 171 km,集雨面积 2300 km²,占广州市总土地面积的 31%。流溪河水系集雨面积在 100 km²以上的河流有 6 条,集雨面积在 50—100 km²的河流有 13 条,集雨面积在 10—50 km²的河流有 47 条,集雨面积在 10 km²以下的主要河涌有 133 条。上游河道地处山区,由源头的小溪流逐渐变为宽约 10m 的小河,河床陡峭,水流湍急,底质多为卵石;良口以下进入丘陵平原区,坡度渐缓,水流速度较慢,河面渐宽,可达 150—300 m,底质主要为泥质或砂质。流溪河水系多年平均年降雨量 1800 mm,最大年平均值可达 2470 mm(1959 年),最小年平均值为 1250 mm(1963 年)。受地形地貌等影响,空间分布总体上呈现自东北往西南递减趋势,中上游年均降雨 1900—2100 mm,下游 1600—1800 mm。每年 4—6 月份为前汛期,占年降雨量的 48.1%,7—9 月份为后汛期,占年降雨量的 33.2%,合计半年(4—9 月)降雨量占全年的 81.3%。

采样点的设置考虑了目标性、代表性、方便性和连续性四个原则,即在整个流域不同土地利用类型、不同河流级别,同时考虑交通运输方便以及与广东省水文局常规监测已设置的样点。于 2018 年 3 月、6 月、9 月、12 月在沿流溪河上游至下游方向的 20 个河流断面对底栖动物进行采样和观测,其中 3 月和 12 月为枯水期,6 月和 9 月为丰水期。采样点分布见图 1,S1—S20 依次为桂峰水源头、桂峰村、石坝河源头、新联村、三桠塘、吕田镇、牛栏河、下腊坑、北溪村、联平村、鸭洞水、碧水湾、温泉镇腊石场、石海桥、从化街口大桥、太平场、大塘、李溪、人和大桥、蚌湖大桥。采样点覆盖了流溪河上游吕田河(S1—S7)和玉溪水(S8—S9)两条源头支流、良口镇和温泉镇所在的中游河段(S11—S14)以及城市化发展较快的下游河段(S15—S20),其中一级河流(即无支流流入的河流)上有 10 个采样点,二级河流(由一级河流汇聚而成)3 个采样点和三级河流(由二级河流汇聚而成)7 个采样点^[15]。

1.2 采样与测定

底栖动物采样用网孔径为 40 目的 D 型网。采集时先用 D 型网在岸边刮取、搅动水生植物,采集其上的底栖动物,再将 D 型网放置于水流的下方,在水流上方清洗较大的石块,然后搅动其底质,使底栖动物流入网中。将采集到的底栖动物用 75% 的酒精保存于样品瓶中带回实验室,在托盘中将底栖动物挑拣出并用体视显微镜对采集到的底栖动物进行鉴定、计数,分类鉴定工作尽量鉴定到属级水平,分类鉴定参考相关书^[4-6,16]。

现场观测记录水深、河宽等形态特征,河流的底质简单按划分为类型数据:淤泥、细沙、砂砾、卵石、圆石和漂石^[17]。使用 YSL-6600 型水质仪记录水温(Temp)、电导率(Cond)、pH、溶解氧(DO)、浊度(Turb)等水体物理参数;采集水样带回实验室,对总氮(TN)、总磷(TP)、硝态氮(NO₃⁻-N)、亚硝态氮(NO₂⁻-N)、氨氮(NH₃-N)、正磷(PO₄³⁻-P)等化学指标则进行测定,测定方法参考《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)^[13,15]。

1.3 数据分析

对环境因子进行了方差分析,分析季节差异以及三个河流级别上的差异。对所有环境因子进行了 PCA 分析,考虑各环境变量的量纲差异,分析前对环境变量进行标准化处理。由于电站发电导致多处河段非自然断流,水深数据不完整,没有用于正式的定量分析。

将相对丰度大于 5% 的分类单元定为优势类群^[18],分析流溪河及其枯水期和丰水期的群落组成。采用物种丰富度、真 Simpson 多样性指数^[19],来表示底栖动物群落结构多样性特征。真 Simpson 多样性指数 $D_{\text{TSim}} = 1/D_{\text{Sim}}$,其中 $D_{\text{Sim}} = 1 - \sum (P_i)^2$, $P_i = n_i(n_i - 1) / N(N - 1)$, $i = 1 \cdots S$, S 为物种丰富度, N 为底栖动物总个体数, n_i 为第 i 种的个体数。

根据河流等级对采样点进行分组,采用方差分析(ANOVA)进行组间比较;在利用主成分分析(PCA)作进一步的分析时,先对 4 个季节中的环境因子进行标准化;在分析影响丰度及多样性与环境因子的关系时,首

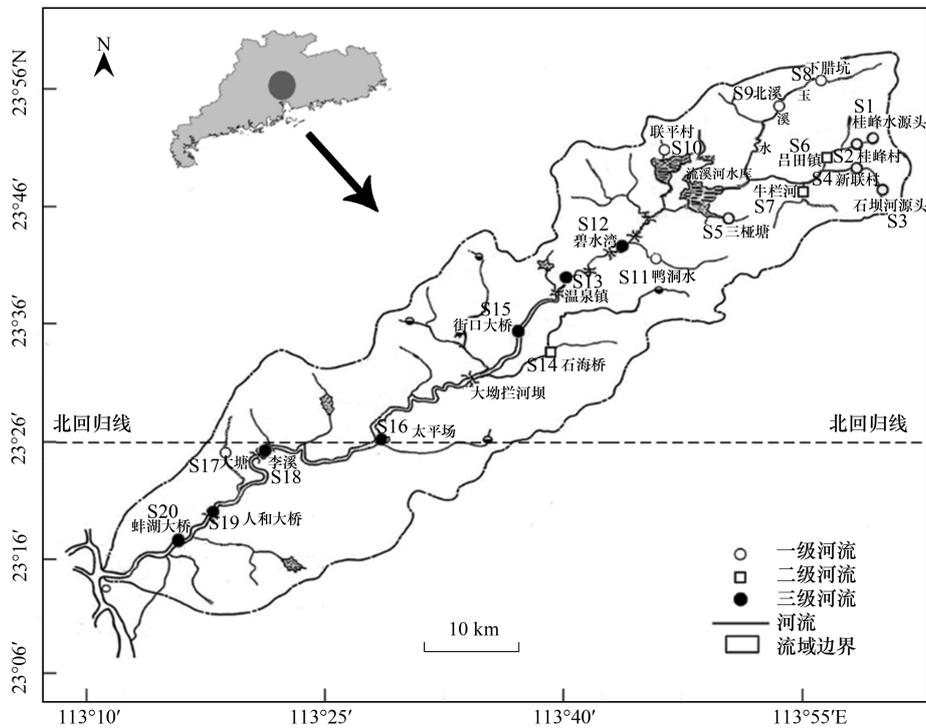


图1 流溪河样点分布图

Fig.1 Spatial locations of 20 sampling sites in Liuxihe River

桂峰水源头(S1)、桂峰村(S2)、石坝河源头(S3)、新联村(S4)、三桠塘(S5)、下腊坑(S8)、北溪村(S9)、联平村(S10)、鸭洞水(S11)、大塘(S17)为一级河流;吕田镇(S6)、牛栏河(S7)、石海桥(S14)为二级河流;碧水湾(S12)、温泉镇(S13)、从化街口大桥(S15)、太平场(S16)、李溪(S18)、人和大桥(S19)、蚌湖大桥(S20)为三级河流

先对环境因子之间的相关性分析,剔除相关性 > 0.7 的因子,计算解释率(R^2_{adj})及显著性(P 值)。

分别对枯水期和丰水期的群落进行分析,对物种丰度(多度)数据进行 Hellinger 转换,采用非度量多维标度排序(nMDS)的方法对转换后的群落数据进行排序,比较所有采样点底栖动物群落之间相似性。在分析影响群落的时空变化的环境因子中,首先进行了去趋势对应分析(DCA)计算群落变化的梯度;若最大的梯度长度 >3 ,则选择典范对应分析(CCA),否则采用冗余分析(RDA)。对全部数据集(4次采样)、枯水期(2次采样)和丰水期(2次采样)的DCA分析之前,先剔除出现频率小于5%的物种,群落变化的最大梯度长度均 >3 ,因此采用了CCA方法对底栖动物进行环境因子约束排序,并使用前向选择筛选统计显著的环境因子。本文所采用的计算和统计分析在R语言平台上完成,涉及的主要软件包为vegan包。

2 结果与分析

2.1 环境因子

水温、浊度、总氮及总磷是反映河流环境特征的重要环境因子。总氮在枯水期和丰水期的变化范围分别为0.64—8.23和0.48—4.74 mg/L,全年平均值为2.13和1.70 mg/L;总磷的变化范围分别为0.17—0.47和0.25—0.54 mg/L,全年平均值均为0.10 mg/L;温度的变化范围分别为11.85—19.31℃和22.64—33.13℃,全年平均值为15.85℃和27.63℃;浊度期的变化范围分别为7.78—66.94 NTU和1.85—78.2 NTU,全年平均值为20.14和17.20 NTU。

方差分析表明,温度表现为春季三级河流显著高于二级河流($P>0.05$),夏季三级河流 $>$ 二级河流 $>$ 一级河流($P>0.05$),秋季三级河流显著高于一级和二级河流($P>0.05$),冬季在不同河流级别间差异不显著($P<$

0.05)。对不同级别河流中环境因子进行季节单因素方差分析,总氮和总磷在季节间差异不显著($P>0.05$);温度一级河流和三级河流表现为夏季和秋季显著高于春季和冬季($P<0.05$),春季显著高于冬季($P<0.05$),二级河流表现为夏季和秋季显著高于春季和冬季($P<0.05$);浊度在一级河流表现为春季显著高于冬季($P<0.05$)。总氮、总磷和浊度在不同级别河流间差异不显著($P>0.05$);

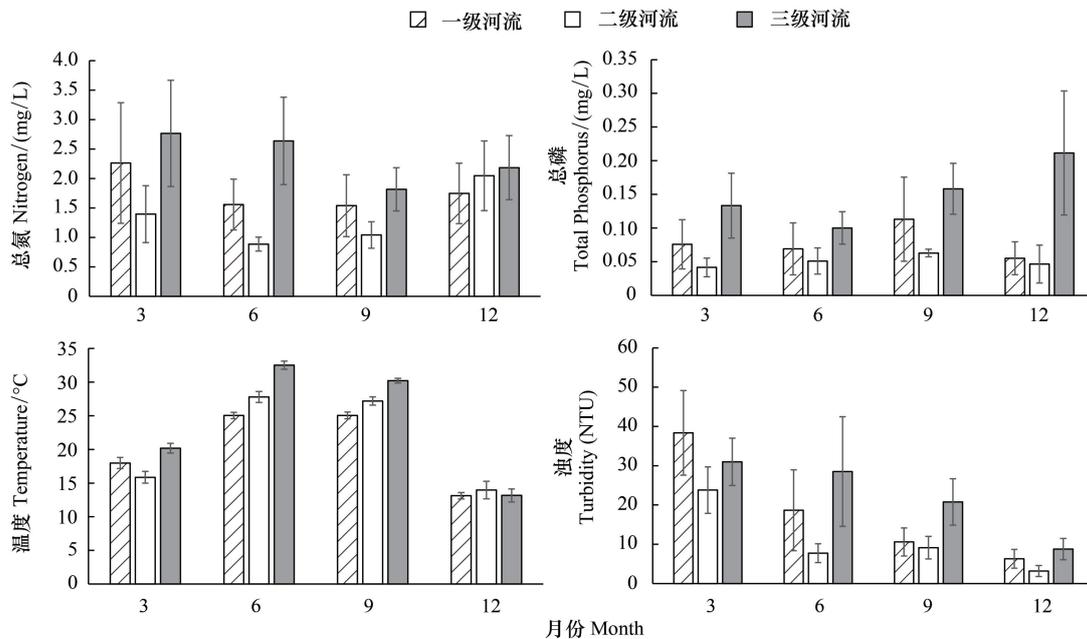


图2 流溪河三个河流级别总氮、总磷、水温度、浊度的季节动态

Fig.2 Seasonal variation of total nitrogen, total phosphorus, water temperature and turbidity in three river classes in Liuxihe River

对环境因子的 PCA 分析表明,在春季(3月),两个主轴的解释 77%,对两个主轴贡献较大的环境因子为电导率、盐度、总磷、pH 和硅酸盐;在夏季(6月),两个主轴的解释为 68%,对两个主轴贡献的环境因子为总磷、浊度、正磷和亚硝酸氮;在秋季(9月),两个主轴的解释为 68%,对两个主轴贡献的环境因子为总氮、硝态氮、亚硝态氮、总磷、正磷、溶解氧和温度;冬季(12月)两个主轴的解释为 62%,对前两轴影响较大的环境因子为总氮、硝态氮、亚硝态氮、总磷、正磷、温度、pH、电导率和溶解氧。根据 PCA 两序图上采样点的分布来看,一级河流和二级河流的环境因子差异不大,它们多数分布在排序图的另一侧,营养盐、浊度、电导率均处于较低水平水平;而大多数三级河流的采样点分布在排序图的另一侧,营养盐、浊度、电导率处于较高水平。需要指出的是,一级河流中的 S8(下腊坑)和 S17(大塘),与三级河流采样点基本分布于同一侧,两个采样点代表的河段分别受到开矿和工业园区的污染,营养盐水平较高。

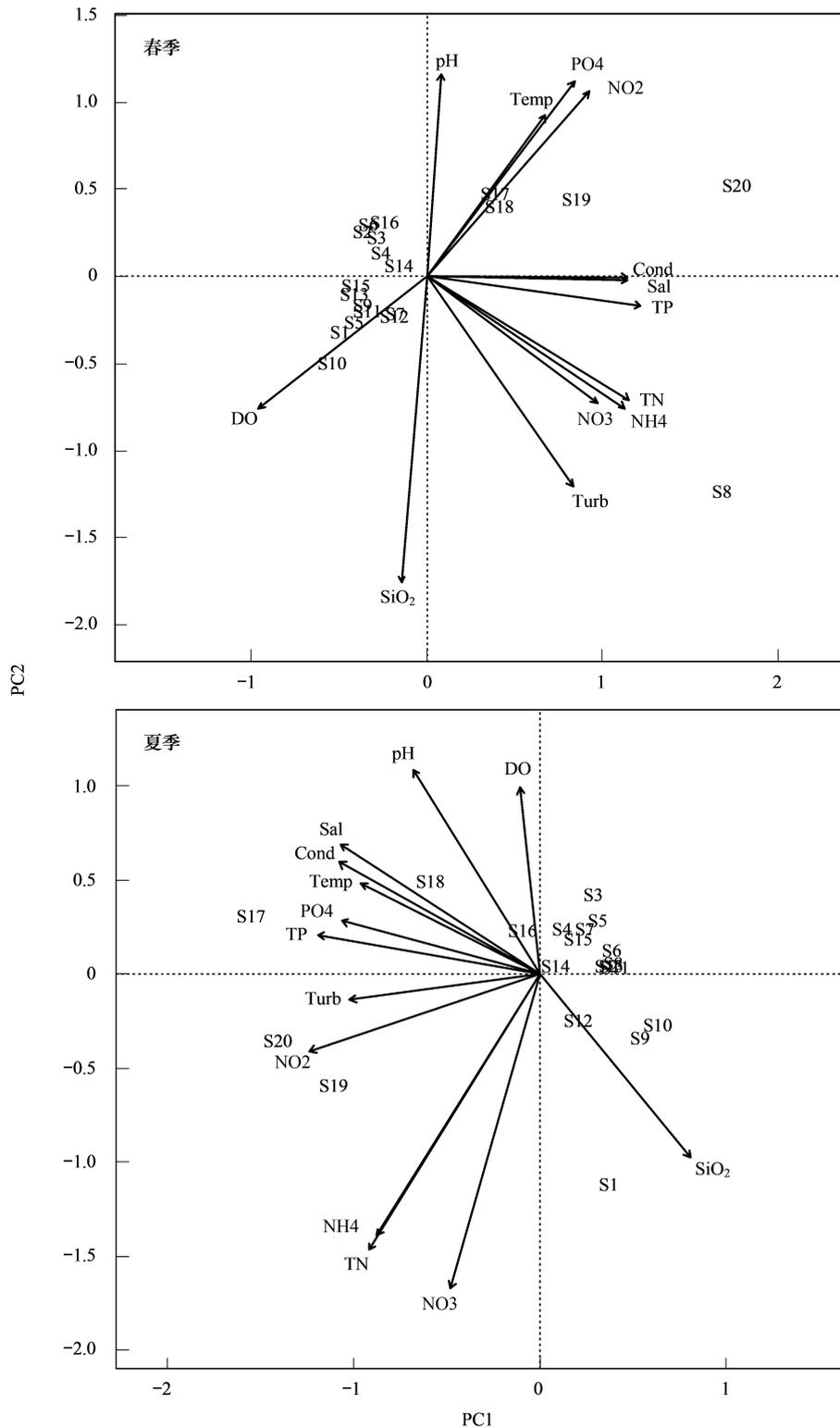
2.2 底栖物种的组成与优势类群

共采集到底栖动物 4621 头,共计 76 分类单元(种或属),隶属于 7 纲 20 目 50 科,包括昆虫纲中的蜉蝣目 12 属、双翅目 15 属、鞘翅目 7 属、蜻蜓目 13 属、毛翅目 5 属,以及双壳纲 3 属、腹足纲 11 属、蛭纲 2 属、寡毛纲 4 属、甲壳纲 1 属,其中水生昆虫相对丰度最高,占 69.39%,其次为腹足纲和双壳纲,相对丰度分别为 18.73% 和 8.88%,蛭纲和寡毛纲最少,相对丰度分别为 1.34% 和 0.89%。

底栖动物的相对丰度最大的 4 个类群为摇蚊族 (*Chironomini*) (20.19%)、河蚬 (*Corbicula fluminea*) (8.55%)、短沟蜷属的一种 (*Semisulcospira* sp.1) (8.12%)、双突细蚌 (*Caenis bicornis*) (7.38%)。出现频率最高的 4 个类群为摇蚊属 (*Chironomus*) (66.2%) 和无突摇蚊属 (*Ablabesmyia*) (57.5%) 的种类,河蚬 (*Corbicula fluminea*) (53.8%),以及双突细蚌 (*Caenis bicornis*) (53.8%)。因此摇蚊、河蚬、细蚌和短沟蜷是流溪河优势底栖动物类群。

2.3 底栖动物丰度和物种多样性

枯水期和丰水期底栖动物总丰度(即2次采样数量之和)分别为2180和2441。方差分析表明,流溪河流域中三级河流的底栖动物丰度春季显著低于冬季($P < 0.05$),一级和二级河流的底栖动物丰度在季节间差异不显著($P > 0.05$);春季二级河流底栖动物丰度显著高于三级河流($P < 0.05$),夏季、秋季和冬季底栖动物丰度在不同级别的河流间差异不显著($P > 0.05$)。



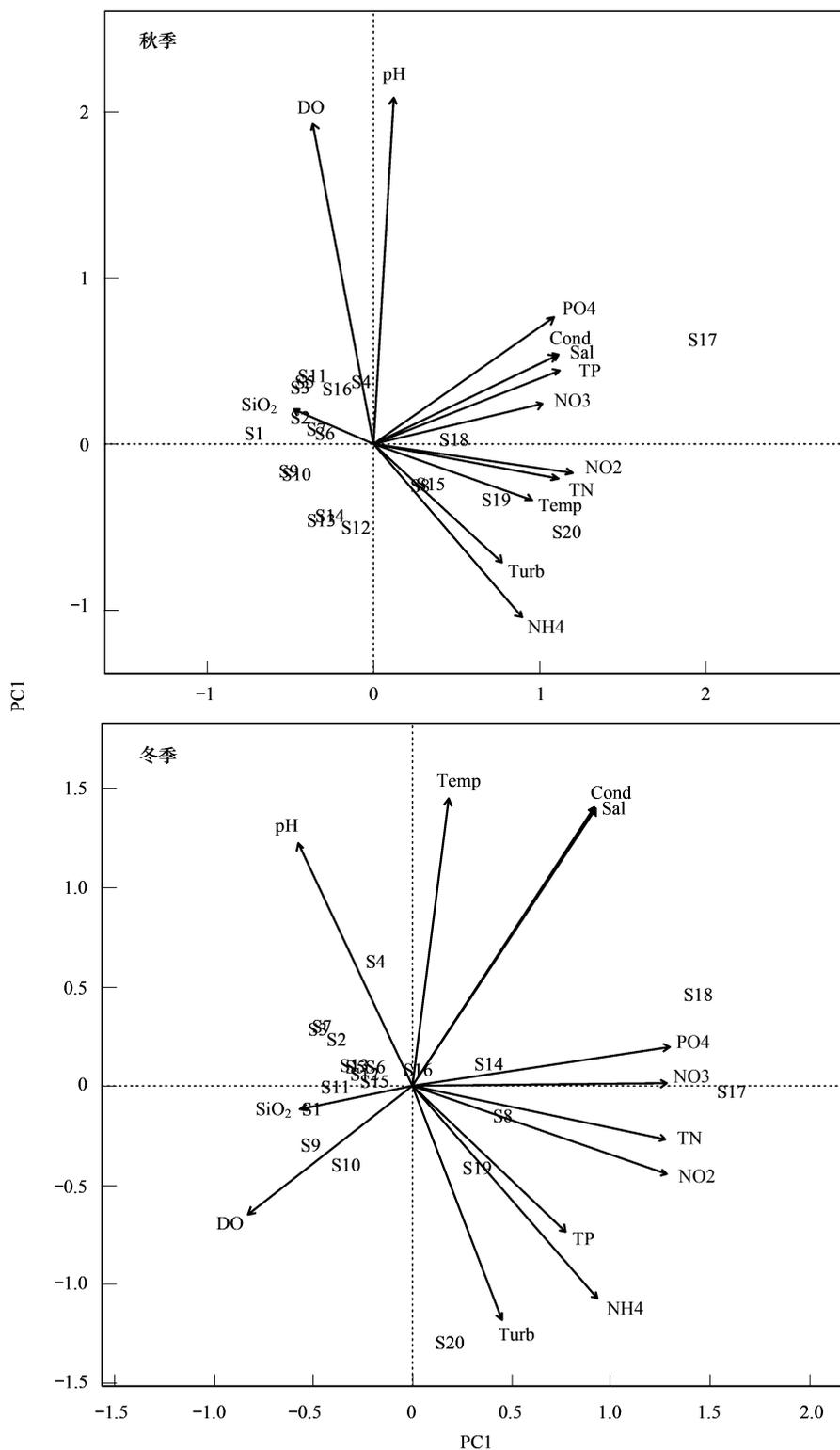


图3 采样点和环境因子在PCA排序图上的分布

Fig.3 The ordination of the sampling sites along two first principal components and the contribution of environmental variables

图4给出了4个季节中4种优势类群在三个河流级别上的分布。方差分析表明,4种优势类群在3个河流级别间均无显著差异($P < 0.05$),摇蚊族、河蚬和短沟蜷属的一种无显著季节性差异($P > 0.05$);在二级河流中,冬季双突细蜉的丰度大于春季和秋季($P < 0.05$)。

枯水期和丰水期累积的物种丰富度(累计物种数)分别 47 和 75。方差分析表明,三种河流级别底栖动物的物种丰富度在季节间差异均不显著($P>0.05$),春季和夏季底栖动物物种丰富度一级、二级河流显著高于三级河流($P<0.05$),秋季和冬季在不同级别河流间无显著差异($P>0.05$)。

在枯水期和丰水期,流溪河底栖动物的真 Simpson 多样性指数范围分别为 1.31—11.24 和 1.68—7.77。方差分析显示,三种河流级别中底栖动物群落真 Simpson 多样性指数在季节间均无显著差异($P>0.05$),春季表现为一级河流和二级河流显著大于三级河流($P<0.05$),夏季二级河流高于三级河流($P<0.05$),秋季和冬季在断面间无显著差异($P>0.05$)。

根据相关系数大小并结合环境变量所指示的环境要素属性,去除了硝态氮、亚硝态氮、氨氮、正磷、盐度 5 个环境因子,对底栖动物的总丰度和物种丰富度与环境因子相关关系进行了多元回归分析,对流溪河底栖动物丰度和物种丰富度解释率较大的因子为总磷和浊度(表 1)。浊度底栖动物丰度和丰水期的物种多样性呈显著负相关;在枯水期,总磷与底栖动物丰度呈显著负相关,而在丰水期则与丰度呈显著正相关。

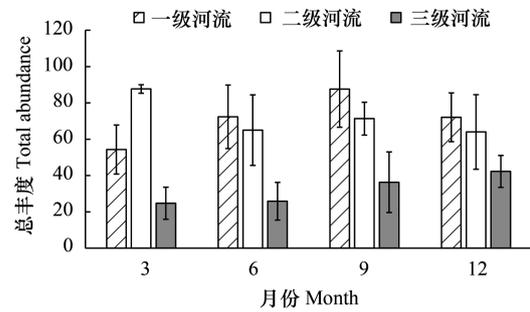


图 4 流溪河 4 个季节中三个河流级别底栖动物的总丰度
Fig. 4 Total abundance of macroinvertebrates in four seasons in three river classes in Liuxihe River

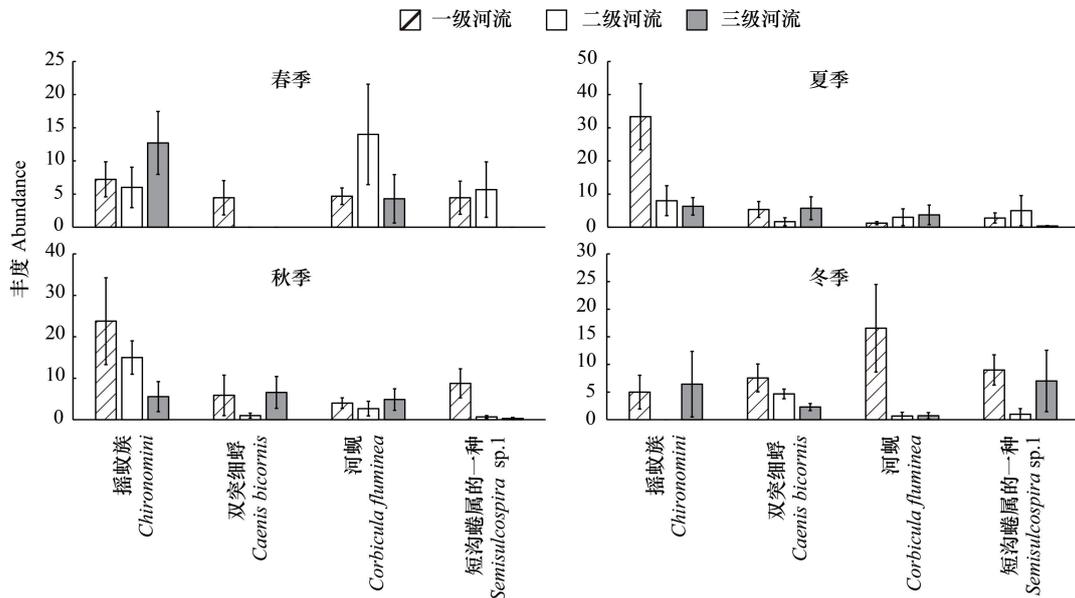


图 5 三个河流级别中底栖动物优势类群的丰度
Fig. 5 Abundance of dominant taxa in three classes of Liuxihe River

2.4 底栖动物群落结构与影响因素

基于 Bray-Curtis 距离,对枯水期和丰水期底栖动物群落进行了 nMDS 排序。枯水期和丰水期的应力函数值分别为 0.17 和 0.2,说明排序结果具有统计意义(图 6)。根据采样点在排序图上的相对位置可以看出,枯水期和丰水期底栖动物群落排序有一定的差异,枯水期中的两个季节底栖动物群落结构差异较大,冬季主要分布在一、三象限和坐标轴附近,春季主要分布在二、四象限和坐标轴附近,三个河流级别之间差异不显著;丰水期的一、二级河流主要分布在二、三象限,而三级河流分散在一、四象限,大多数夏季和秋季采样点在排序图上距离较近。

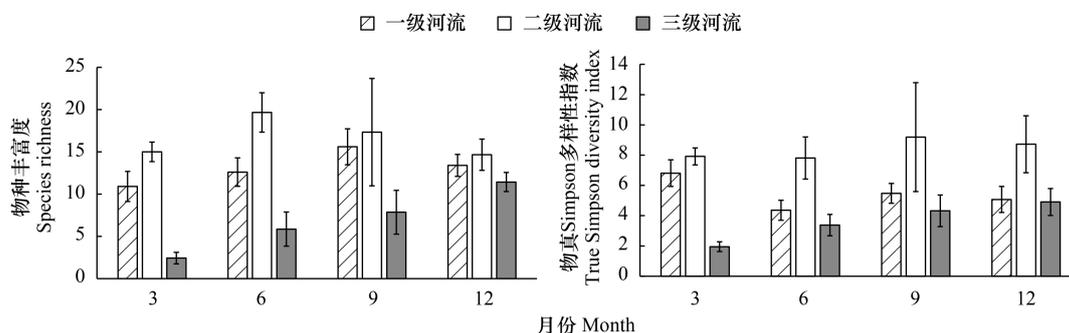


图 6 流溪河 4 个季节底栖动物的物种丰富度和真 Simpson 多样性指数

Fig.6 Species richness and true Simpson diversity of macroinvertebrates in four seasons in Liuxihe River

表 1 流溪河底栖动物的丰度和物种多样性与环境因子的多元回归分析

Table 1 Multiple regression analysis of macroinvertebrate abundance and species richness with environmental variables

		模型 Model	样本数 N	矫正 R^2	P
丰度 Abundance	枯水期	$\lg(\text{Total}) = 1.22 - 0.01\text{TN} - 0.32\lg(\text{TP})^* + 0.03\text{pH} - 0.003\text{Temp} - 0.004\text{Turb}^*$	39	0.33	$P < 0.05$
	丰水期	$\lg(\text{Total}) = 1.35 - 0.12\text{TN} + 0.36\lg(\text{TP})^* + 0.15\text{pH} - 0.004\text{Temp} - 0.005\text{Turb}^* - 0.003\text{SpCond}$	37	0.4	$P < 0.05$
	全年	$\lg(\text{Total}) = 1.12^* - 0.01\text{TN} - 0.25\lg(\text{TP})^* + 0.07\text{pH} - 0.002\text{Temp} - 0.005\text{Turb}^*$	76	0.35	$P < 0.001$
物种丰富度 Species richness	枯水期	$\lg(\text{Richness}) = 0.63 - 0.01\text{TN} - 0.23\lg(\text{TP}) + 0.07\text{pH} - 0.03\text{Temp}$	39	0.28	$P < 0.05$
	丰水期	$\lg(\text{Richness}) = 1.89^{**} - 0.07\text{TN} + 0.49\lg(\text{TP}) + 0.01\text{pH} - 0.02\text{Temp} - 0.004\text{Turb}^* - 0.001\text{SpCond}$	37	0.45	$P < 0.001$
	全年	$\lg(\text{Richness}) = 0.27 + 0.004\text{TN} - 0.21\lg(\text{TP})^* + 0.09\text{pH} - 0.004\text{Turb}^*$	76	0.32	$P < 0.001$

* 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.001$

在对全年 4 次调查数据的 CCA 分析中,前向选择表明对流溪河底栖动物群落结构变异的主要显著解释因子有水温、硝态氮、盐度、溶解氧、浊度、总磷和亚硝酸氮,它们对流溪河群落结构变异的总解释率(R_{adj}^2)为 14%。在对枯水期,影响底栖动物群落结构的主要环境因子为 pH 和硝态氮,它们对流溪河枯水期群落结构变异的解释率为 9%;在丰水期,底栖动物群落结构的主要影响因子为 pH、溶解氧、水温、电导率和硅酸盐,对流溪河丰水期群落结构变异的解释率为 25%。在枯水期,短沟蜷与硝态氮呈正相关,四节蜉属、萝卜螺属和摇蚊属等类群与 pH 呈负相关;而在丰水期,双突细蜉、田螺属的类群与电导率呈正相关,淡水壳菜、河蚌与水温呈正相关。

3 讨论

3.1 物种组成与空间分布

本研究自流溪河上游到下游设置采样点,覆盖了该河流的所有三个级别的支流与干流,较为全面地调查了流溪河的底栖动物物种组成与空间分布。已有研究表明,不同类群底栖动物的物种丰富度在地理梯度上存在各自的规律,而相当一部分变化是由温度解释的^[20]。流溪河地处热带和亚热带交界处,属于低纬度地区,与中、高纬度地区河流底栖动物物种组成有明显不同。流溪河在种类组成上耐污种摇蚊族数量最多(相对丰度 20%),河蚌、短沟蜷属的一种以及双突细蜉的相对丰度都在 7%—9%之间。在我国高纬度地区,如东北地区松花江水系上游^[21],两条支流的丰水期和枯水期优势分类单元中相对丰度最大的钩虾(*Gammarus* sp.)和

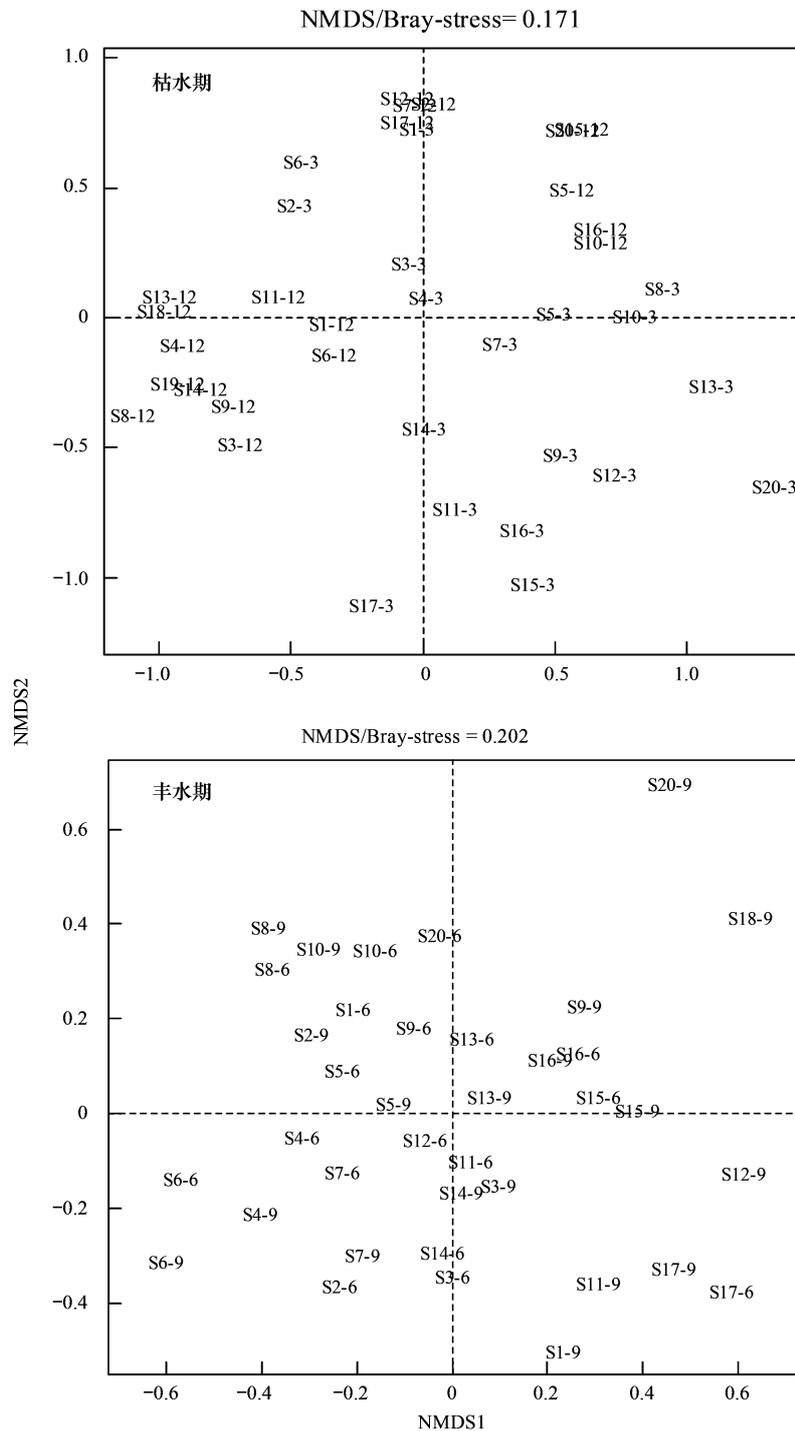


图 7 底栖动物群落结构的非度量多维标度排序

Fig.7 The non-metric multidimensional scaling ordination of macroinvertebrate communities

舌石蛾 (*Glossosoma* sp.), 相对丰度都在 20%—30% 之间, 该地区由于两岸郁闭度高, 凋落叶可为作为撕食者的钩虾提供直接食物来源, 使得钩虾成为主要优势类群; 在中纬度地区, 如神农架地区的溪流^[22], 优势分类单元 (四节蜉、扁蜉、直突摇蚊亚科、细蜉、真凯式摇蚊) 的累计相对丰度为 63.5%, 该调查河段以溪流居多, 以水生昆虫占主要优势, 尤其是喜好定殖在洁净溪流中的蜉蛄目幼虫。

有关流溪河底栖动物群落的物种多样性与组成结构的早期观测, 刘玉等在枯水期 (1999 年 10 月和 2000

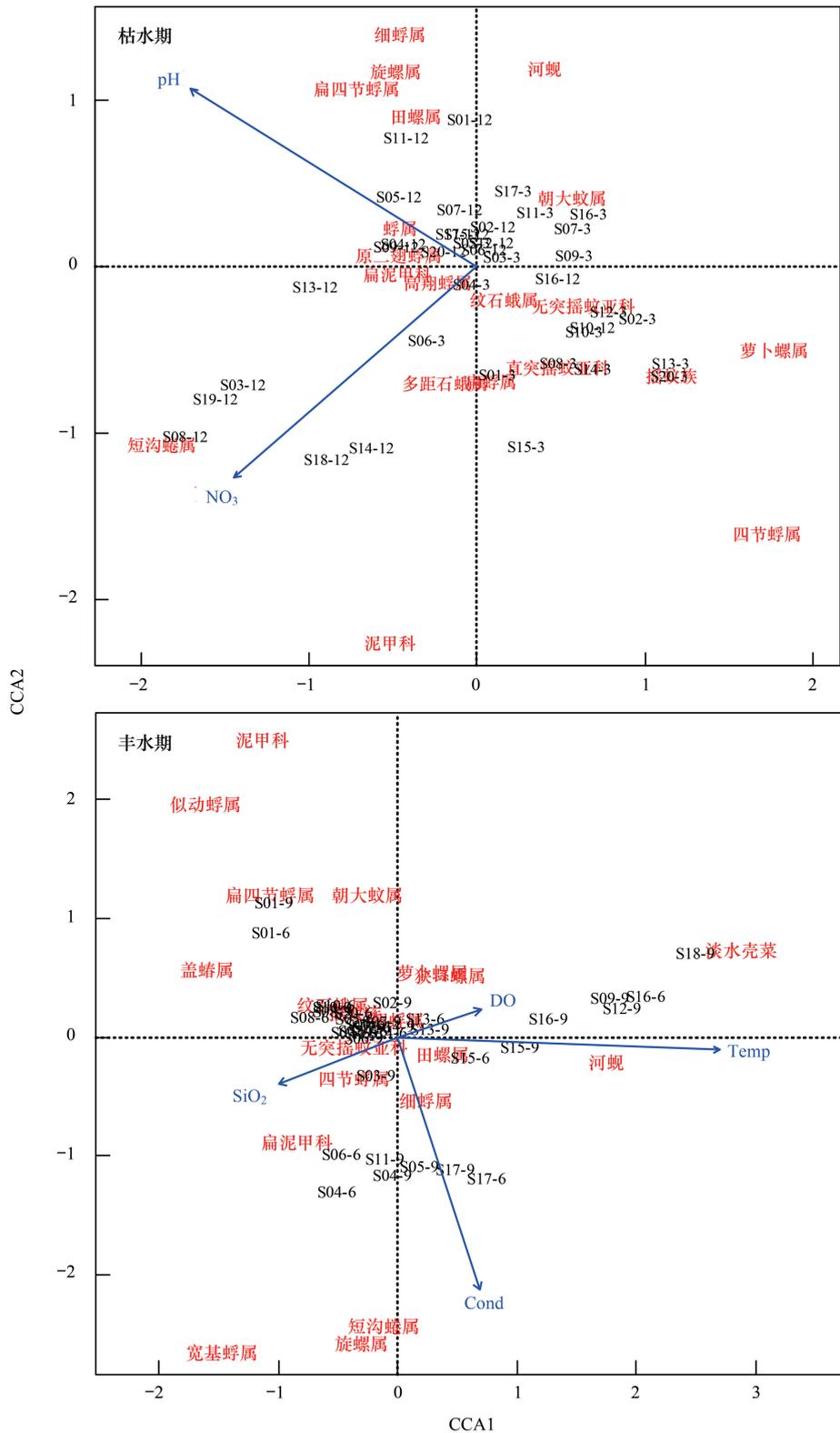


图 8 枯水期和丰水期流溪河底栖动物群落结构典范对应分析

Fig.8 Canonical correspondence analysis of macroinvertebrates community in Liuxihe River

年 1 月)对流溪河最下游(江村附近到鹤岗上游 4 个采样点)底栖动物的 2 次采样调查,该调查的报道中仅检测到软体动物、颤蚓类和摇蚊等耐污种^[1]。本研究对流溪河下游(从化街口大桥到蚌湖大桥 6 个采样点)枯

水期的两次调查数据表明,其物种组成包括昆虫纲中的蜉蝣目 8 种、双翅目 5 种、蜻蜓目 1 种、鞘翅目 3 种、毛翅目 3 种,以及双壳纲 2 种、腹足纲 4 种,蛭纲、寡毛纲和甲壳纲各 1 种,物种丰富度有明显增加,出现了蜉蝣目、毛翅目等对水质要求较高的清洁物种,说明流溪河下游水质得到了改善。

在我们所调查的 4 个季节中 3 个河流级别底栖动物的差异显著性不一致,但总体上随着河流级别的增加底栖动物的丰度和物种多样性呈降低趋势,说明流溪河低级别河段的水环境更适宜底栖动物生存,这也与源头河段的茂密植被以及相对较少的人类活动干扰有关。张晓可等于 2013 年在青戈江的 4 个级别河流的调查结果则认为二级河流底栖动物密度最大,中级河最少^[23]。流溪河的三级河流(即干流)受到严重的人为干扰,如流溪河在街口大桥处流经具有 50 万人口的小型城市—从化市,河流受生活污水排放影响较大,太平场、李溪、蚌湖大桥和人和大桥也都是干流,相较于该河流的一、二级河流(多为山间、农田和村落中的溪流)不利于底栖动物群落的发育,太平场和李溪村分别受到防洪堤岸和生活污染的影响,仅有少数耐污底栖类群可以生存。三个河流级别的河流水体中底栖动物的季节差异显著性不一致,只有三级河流(干流)的底栖动物丰度受季节因素影响显著,可能与下游蚌湖大桥和人和大桥受到潮涌的季节性影响有关。

3.2 影响群落结构的主要环境因子

底栖动物群落的种类组成与数量结构取决于区域的物种库,以及环境因子对物种的筛选,特别是水质等环境因素对底栖动物的生长、繁殖及群落结构有显著影响^[24-27]。流溪河地处热带-亚热带区域,由于降雨的影响,河流环境季节变化显著,又由于该地区人类活动频繁,对河流环境有较强的干扰。同时,河流由于人类活动频繁,特别大量的梯级电站,对河床底质的影响较大,多处河段出现非自然断流,导致了河流底质均一化(均为大片基岩加细沙底,卵石底稀少),部分监测断面水深数据缺失因此本文主要考虑污染带来的水质改变等因素。从本研究所测定的数据可以看出,所有三级河流的采样点及一级河流中的 2 个采样点:腊石场和大塘具有较高的营养盐与浊度水平;作为营养盐指标的总氮、总磷,其总体水平在三级河流均较高。从多元回归分析结果来看,总磷和浊度为影响底栖动物总丰度和生物多样性的主要影响因子。热带亚热带的河流水环境形成了流溪河底栖动物群落结构的分布差异,以及显著的季节动态。在丰水期,底栖动物的丰度与总磷呈正相关,而枯水期底栖动物的丰度则与总磷呈显著负相关,反映了底栖动物与总磷在季节上的不同步性。本研究中枯水期和丰水期的底栖动物丰度和生物多样性与浊度均呈显著负相关关系,其与水中悬浮物(主要是泥土、沙砾、细微的有机物和无机物、浮游生物和微生物等)的含量、大小及折射系数等有关,虽不能直接反映水质情况,但浊度增加会导致水下光强降低,从而降低初级生产力,水体浊度的增加会阻碍部分底栖动物对食物和溶氧的获取,阻碍光照,从而降低水生生物的初级生产力,影响底栖动物生长,致使数量和物种丰富度减少^[28]。

nMDS 排序反映了枯水期和丰水期影响底栖动物群落的因素是不一致的,在枯水期主要环境因子(浊度和温度)在春季和冬季间的显著差异,导致 20 个采样点的分布格局较为清晰。丰水期中的夏季和秋季环境因子具有较高的相似性,在 3 个河流级别中,随着人为干扰程度的增加,差异性减弱。对流溪河全年、枯水期和丰水期底栖动物群落分别进行的多元排序分析(CCA)所获得的主要影响环境因子不尽相同。其中,温度是制约底栖动物生理条件的最主要环境因子,底栖动物是变温动物,不同的底栖动物拥有不同的最适生长温度,其生长、繁殖和新陈代谢在很大程度上受到水温的影响^[29-30]。对流溪河的全年 4 次(12—33℃)和 2 次丰水期(23—33℃)采样时,水温波动范围相对较大,在很大程度上影响了底栖动物群落结构的分布与季节特征。而电导率本身与水温呈正相关,因为丰水期降雨多流速大,水里含的可溶性导电杂质增多,河水的电导率也随之上升,所以丰水期水温升高的时候,电导率也随之上升。这个时期我们的调查中采集到较多的双突细蜉,而细蜉科的类群虽然通常是生活在河流的深潭生境(静水水体),但双突细蜉我们也常在急流底部发现,因此,丰水期电导率较高很可能是其成为优势类群的主导因素,CCA 分析结果正印证了这一点。此外,枯水期雨水少,污染物浓度增高,所以耐有机污染的短沟蜉增多。此外,因为流溪河是基岩底的河流,由于城市化、人类活动,河岸植被盖度降低、光照强度增加,又由于污染导致水体营养盐浓度升高,附生藻类密度及其生产

力很可能大大提高,因此可能会局部增加底栖动物的丰度尤其是其中的刮食者的比例,这可能是为什么短沟蜷这类细沙底河流种的常见刮食者,成为流溪河的优势类群的原因之一。我们可以从河流中的硅酸盐含量间接验证这一点,水体中的硅酸盐浓度是硅藻等附生藻类依赖的营养盐,已有研究表明硅藻生物量及丰度与底栖动物密度呈现负相关关系^[31]。本研究中4次采样和丰水期硅酸盐含量均在6.7—23.9 mg/L之间波动,对底栖动物群落结构较大的间接影响,这说明今后需要在多元统计分析将硅藻列入影响变量。溶解氧反映了河流的水流(覆氧)与污染(耗氧)情况,较低的溶解氧说明河流存在较强的耗氧过程,低氧状态将限制底栖动物的同化速率^[32]。本研究中全年的4次采样和2次的丰水期溶解氧在断面和季节间波动较大,尤其是丰水期水位的升高会导致深水区含氧量降低,这对好氧类群的生长产生抑制。

3.3 保护措施及建议

流溪河水系是广州最重要的水系,从发源地—从化吕田桂峰山,河流大致从东北向西南流去,经从化区良口、街口、太平、花都区花东、黄埔区九龙、白云区钟落潭、人和至江村南岗口与白坭河相汇注入珠江。从碧水湾(采样点S12)开始进入三级河流,三级(主要位于干流下游)受到严重的人为干扰和快速城市化影响。这些人为干扰突出地反映在水体氮和磷的浓度的显著升高。从传统上看出,流溪河的一级河流为小型溪流,主要受到山地农业的影响,人为活动的强度较低。随着新农村的建设,山地特种农业和农村观光业的大力发展加强加剧对溪流的影响。作为广州后花园的从化地区,地方政府加强了房地产业,对二级河流的影响已十分明显。三个河流等级上,流溪河生态系统与底栖群落所面临的人为活动是不同的。目前流溪河是广州市河长制整治与管理的最重要的河流,需要针对性控制人类活动的强度。

特别需要指出的是,由于流溪河上建有大量小型电站,不少河段存在非自然断流,以及存在不同类型的采砂行为,导致底质与水深变化的非自然性。这种情况说明,对人为影响或干扰较为剧烈的河流,需要采用考虑其它替代性指标,以反映这种人类活动强度及其变化。

参考文献 (References):

- [1] 刘玉, Vermaat J E, de Ruyster E D, de Kruijf H A M. 珠江、流溪河大型底栖动物分布和氮磷因子的相关分析. 中山大学学报: 自然科学版, 2003, 42(1): 95-99.
- [2] 黄霞, 赵璐. 广州市流溪河流域水环境状况初步调查与保护措施研究. 广州环境科学, 2017, 32(1): 12-16.
- [3] 贾超, 邹壮娇, 肖春意, 巫富强, 罗文镜, 张丽敏, 何景堂. 广州流溪河流域水质污染现状调查与研究. 广东化工, 2018, 45(15): 138-1397.
- [4] Morse J C, Yang L F, Tian L X. Aquatic Insects of China Useful for Monitoring Water Quality. Nanjing: Hohai University Press, 1994.
- [5] Merritt R W, Cummins K W. An Introduction to the Aquatic Insects of North America. 3rd ed. Los Angeles: Kendall/Hunt Publishing, 1996.
- [6] Thorp J H, Covich A P. Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates. 3rd ed. Cambridge (Massachusetts): Academic Press, 2010.
- [7] Múria C, Bonada N, Vellend M, Zamora-Muñoz C, Alba-Tercedor J, Sainz-Cantero C E, Garrido J, Acosta R, El Alami M, Barquín J, Derka T, Álvarez-Cabria M, Sáinz-Bariain M, Filipe A F, Vogler A P. Local environment rather than past climate determines community composition of mountain stream macroinvertebrates across Europe. Molecular Ecology, 2017, 26(21): 6085-6099.
- [8] Ding N, Yang W F, Zhou Y L, González-Bergonzoni L, Zhang J, Chen K, Vidal N, Jeppesen E, Liu Z W, Wang B X. Different responses of functional traits and diversity of stream macroinvertebrates to environmental and spatial factors in the Xishuangbanna watershed of the upper Mekong River Basin, China. Science of the Total Environment, 2017, 574: 288-299.
- [9] Cseresa A, Krasznai-K E Á, Várbró G, Szivák I, Tóth M, Árvai D, Bódis E, Deák C, Mauchart P, Móra A, Erős T, Padišák J, Boda P. Seasonal changes in relative contribution of environmental control and spatial structuring on different dispersal groups of stream macroinvertebrates. Hydrobiologia, 2019, 828(1): 101-115.
- [10] 蒋万祥, 贾兴焕, 周淑婵, 李凤清, 唐涛, 蔡庆华. 香溪河大型底栖动物群落结构季节动态. 应用生态学报, 2009, 20(4): 923-928.
- [11] 许晨. 长白山源头溪流大型底栖动物群落特征初步研究[D]. 长春: 东北师范大学. 2017.
- [12] 王备新, 杨莲芳, 胡本进, 单林娜. 应用底栖动物完整性指数 B-IBI 评价溪流健康. 生态学报, 2005, 25(6): 1481-1490.
- [13] 林罗敏, 官昭瑛, 郑训皓, 林叔忠, 王质军, 陈刚, 韦桂峰. 流溪河底栖动物群落结构及基于完整性指数的健康评价. 生态学报, 2017, 36(7): 2077-2084.

- [14] 刘帅磊, 王赛, 崔永德, 王林, 何文祥, 龙胜兴, 杨扬. 亚热带城市河流底栖动物完整性评价——以流溪河为例. 生态学报, 2018, 38(1): 342-357.
- [15] 卓泉龙, 林罗敏, 王进, 黄小兰, 唐鹊辉, 韦桂峰. 广州流溪河氮磷浓度的季节变化和空间分布特征. 生态学杂志, 2018, 37(10): 3100-3109.
- [16] 辽宁省环境监测实验中心. 辽河流域底栖动物监测图鉴. 北京: 环境科学出版社, 2014.
- [17] Cummins K W. An Evaluation of some techniques for the collection and analysis of benthic samples with special emphasis on lotic waters. The American Midland Naturalist, 1962, 67(2): 477-504.
- [18] Bunn S E, Edward D H, Loneragan N R. Spatial and temporal variation in the macroinvertebrate fauna of streams of the northern Jarrah Forest, Western Australia; community structure. Freshwater Biology, 1986, 16(1): 67-91.
- [19] Jost L. Partitioning diversity into independent alpha and beta components. Ecology, 2007, 88(10): 2427-2439.
- [20] Heino J. Concordance of species richness patterns among multiple freshwater taxa: a regional perspective. Biodiversity and Conservation, 2002, 11(1): 137-147.
- [21] 樊海娟. 长白山松花江水系两类特征河流大型底栖无脊椎动物群落结构特征的比较研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2016.
- [22] 汪兴中. 神农架地区溪流底栖动物分布特征及其与环境因子关系研究[D]. 武汉: 中国科学院水生生物研究所, 2012.
- [23] 张晓可, 宣昊, 王慧丽, 于道平, 严云志, 彭增辉. 青弋江流域不同级别河流底栖动物群落结构研究. 长江流域资源与环境, 2014, 23(12): 1659-1664.
- [24] Heino J. Lentic macroinvertebrate assemblage structure along gradients in spatial heterogeneity, habitat size and water chemistry. Hydrobiologia, 2000, 418(1): 229-242.
- [25] Xie Z, Zhang J, Cai K, Xu Z A, Wu D H, Wang B X. Temporal and spatial distribution of macrobenthos communities and their responses to environmental factors in Lake Taihu. Acta ecologica Sinica, 2016, 36(1): 16-22.
- [26] Miserendino M L. Macroinvertebrate assemblages in Andean Patagonian rivers and streams; environmental relationships. Hydrobiologia, 2001, 444(1/3): 147-158.
- [27] 李艳利, 李艳粉, 徐宗学. 影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析. 环境科学, 2015, 36(1): 94-106.
- [28] 刘宝兴. 苏州河生态恢复过程中底栖动物的研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- [29] Dudgeon D. The population dynamics of some freshwater carideans (Crustacea: Decapoda) in Hong Kong, with special reference to *Neocaridina serrata* (Atyidae). Hydrobiologia, 1985, 120(2): 141-149.
- [30] Arscott D B, Tockner K, Ward J V. Spatio-temporal patterns of benthic invertebrates along the continuum of a braided Alpine river. Archiv für Hydrobiologie, 2003, 158(4): 431-460.
- [31] 刘玉, Vermaat J E, de Ruyter E D, de Kruijf H A M. ISO-BMWP 底栖动物监测法在中国河流有机污染评价中的修正及应用. 中山大学学报: 自然科学版, 2004, 43(4): 102-105.
- [32] Martien R F, Benke A C. Distribution and production of two crustaceans in a wetland pond. The American Midland Naturalist, 1977, 98(1): 162-175.